



ANISOTROPI DIELEKTRIK DAN ARGUMEN BAGI SERAT-UJUNG: ORIENTASI JALUR BEBAN KAPASITIF PADA PENYANGGA KABEL KAYU YANG NETRAL SECARA MAGNETIK

Anisotropi Dielektrik dan Argumen bagi Serat-Ujung: Orientasi Jalur Beban Kapasitif pada Penyangga Kabel Kayu yang Netral Secara Magnetik

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Penyangga kabel kayu adalah benda dielektrik yang ditempatkan di medan dekat konduktor sinyal, sehingga kontribusinya terhadap instalasi berupa kapasitansi terdistribusi dan bergantung orientasi, yang tersusun paralel dengan kabel. Dalam pembahasan utama mengenai penilaian netralitas kayu (Bosque, Ferro, Park dan Tanaka, 2026), orientasi serat diidentifikasi sebagai variabel desain dan penggilingan serat-ujung-vertikal diterapkan berdasarkan argumen gabungan mekanis dan dielektrik yang dinyatakan dalam satu bagian. Makalah pendamping ini mengembangkan argumen tersebut sepenuhnya. Kayu bersifat anisotropik secara dielektrik: permitivitas relatif ϵ_{ps_r} maupun tangen rugi $\tan \delta$ lebih tinggi sepanjang serat daripada melintasinya, dengan sumbu sepanjang-serat melebihi kedua sumbu transversal karena geometri sel trakeid dan pembuluh berbentuk tabung serta dipol air-terikat yang mendominasi polarisasi terselaraskan dengan serat. Kami melaporkan pengukuran ϵ_{ps_r} dan $\tan \delta$ menggunakan peng analisis impedansi pelat-sejajar berpelindung pada jati ekuatorial di sepanjang ketiga sumbu anatomis (longitudinal L, radial R, tangensial T) pada kadar air 8, 12, dan 16 persen dari 20 Hz hingga 10 MHz, yang mengonfirmasi rasio anisotropi $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ sebesar 1,24 hingga 1,31 pada frekuensi audio dan kadar air 12 persen. Berdasarkan konstanta ini, kami membangun model kapasitansi terdistribusi bagi kabel yang bertumpu dalam dudukan bermesin di atas kolom kayu dan menghitung kontribusi kapasitif per blok untuk penggilingan serat-ujung-vertikal dibanding serat-permukaan: kedua orientasi berbeda dengan margin terukur, dengan serat-ujung menghasilkan kapasitansi beracuan kabel yang lebih rendah karena menempatkan sumbu transversal berpermitivitas rendah pada bidang horizontal tempat medan kabel paling kuat dan menyisihkan sumbu longitudinal berpermitivitas tinggi bagi jalur beban vertikal, tempat sumbu tersebut tidak berbahaya secara elektrik dan ideal secara mekanis. Sapuan sudut serat menemukan kopling minimum pada serat-ujung sejati. Kami menutup dengan mencatat bahwa serat-ujung awalnya ditetapkan demi kekakuan tekan, dan bahwa argumen dielektrik, yang diperoleh secara independen dan setelahnya, sejalan dengan argumen mekanis hingga taraf mengonfirmasinya.

1. PENDAHULUAN

Penyangga kabel tidak membawa sinyal. Ia berada di sampingnya. Tepat karena itulah peran elektriknya begitu mudah dikesampingkan: sebonkah kayu di bawah kabel jelas tidak berada dalam rangkaian, sehingga menggiurkan untuk menyimpulkan bahwa komposisi, serat, dan orientasinya merupakan urusan pembuat kabinet alih-alih insinyur. Makalah utama mengenai penilaian netralitas (Bosque, Ferro, Park dan Tanaka, 2026) mengemukakan sisi magnetik argumen tersebut -- bahwa penyangga yang terus bersentuhan dengan konduktor menjadi bagian dari lingkungan medan dekat konduktor itu, dan bahwa kandungan paramagnetik residualnya merupakan masukan terukur bagi instalasi, bukan dekorasi. Makalah tersebut menyelesaikan sisi dielektrik dalam satu bagian. Makalah ini adalah bagian itu, yang diperluas hingga sepanjang yang layak bagi fisikanya.

Fakta elektrik bahwa blok berada di samping kabel alih-alih di dalamnya tidak mengeluarkannya dari rangkaian; fakta itu menetapkan cara koplingnya. Benda dielektrik dalam medan konduktor menyimpan energi secara kapasitif, dan kapasitansi terdistribusi yang paralel dengan saluran transmisi merupakan beban, kecil tetapi nyata, yang besarnya bergantung pada permitivitas benda dan pada orientasi permitivitas itu relatif terhadap medan. Kayu bukan dielektrik isotropik. Permitivitasnya bergantung arah, sehingga penyangga kayu bukan memiliki satu kontribusi dielektrik, melainkan tiga, yang dapat dipilih di meja penggilingan melalui sudut pemotongan balok.

Klaim makalah ini sempit dan kuantitatif. Klaimnya adalah bahwa orientasi serat-ujung-vertikal yang ditetapkan bagi Blok Elevasi Ekuatorial -- lingkaran pertumbuhan pada sisi atas, serat menjulur vertikal menuruni jalur beban -- merupakan orientasi yang meminimalkan kapasitansi blok beracuan kabel, bahwa nilai minimum itu terukur alih-alih sekadar dugaan, dan bahwa ia bertepatan dengan orientasi yang telah dipilih atas dasar mekanis. Kami tidak mengklaim efeknya besar. Kami mengklaim efeknya memiliki tanda, besaran, dan arah yang disukai, dan bahwa pembuat yang menggiling blok dengan arah sebaliknya demi serat permukaan yang lebih cantik telah menggeser angka ke arah yang salah tanpa mengetahui angka itu ada.

2. ANISOTROPI DIELEKTRIK KAYU

Kayu adalah padatan seluler yang tersusun dari sel panjang, berongga, dan terselaraskan secara aksial -- trakeid pada kayu lunak, serat dan pembuluh pada kayu keras seperti jati -- yang sumbu panjangnya mendefinisikan arah serat. Geometri ini merupakan asal anisotropi mekanis yang diketahui setiap pekerja kayu, sekaligus asal anisotropi dielektrik yang lebih jarang dihargai tetapi sama nyata dan telah lama didokumentasikan (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Tiga mekanisme membuat permitivitas bergantung arah, dan ketiganya mengutamakan sumbu longitudinal. Pertama, dinding sel sendiri membentuk jalur terpolarisasi yang berkesinambungan di sepanjang serat dan terputus-putus melintasinya, sehingga polarisasi antarmuka (Maxwell-Wagner) pada banyak batas dinding-lumen terutama terakumulasi sepanjang serat. Kedua, air terikat yang tertahan dalam dinding sel -- penyumbang dominan permitivitas kayu kecuali dalam keadaan paling kering -- berada



dalam lingkungan yang situs hidroksil dan perancah mikrofibrilnya juga terselaraskan dengan serat, sehingga polarisasi orientasional dipol air-terikat lebih mudah sepanjang serat daripada melintasinya. Ketiga, kedua arah transversal, radial R dan tangensial T, hanya sedikit berbeda satu sama lain, dan keduanya berada jauh di bawah nilai longitudinal L. Hasilnya, secara konsisten di seluruh literatur, adalah urutan $\epsilon_{s_L} > \epsilon_{s_R} \sim \epsilon_{s_T}$, dengan urutan yang sama pada tangen rugi, dan rasio anisotropi $\epsilon_{s_L} / \epsilon_{s_T}$ yang biasanya 1,2 hingga 1,5 bagi kayu keras iklim sedang dan tropis dalam rentang higroskopis.

Nilai absolutnya sedang dan didominasi oleh kelembapan. Kayu kering-oven berada di sekitar $\epsilon_{s_r} = 2$ hingga 3, lalu naik tajam dan monoton saat kadar air meningkat, karena setiap tambahan air terikat menambah dipol pada inventaris yang dapat dipolarisasi. Ketajaman kenaikan ini menjadi alasan kadar air, bukan spesies, merupakan tuas terbesar atas kontribusi dielektrik penyangga, dan hal tersebut dibahas pada Bagian 5. Bagi argumen anisotropi, pokok utamanya bersifat struktural alih-alih numerik: arah dengan permitivitas tertinggi adalah arah serat, dan arah itu ditentukan pekerja kayu, bukan pohon.

3. PENGUKURAN: PERMITIVITAS DAN RUGI SEPANJANG TIGA SUMBU

Kami mengukur ϵ_{s_r} dan $\tan \delta$ pada kupon jati bermesin yang dipotong mengikuti masing-masing dari tiga sumbu anatomis, sehingga medan yang diterapkan sel pelat-sejajar melintasi sampel secara bergantian dalam arah longitudinal, radial, dan tangensial. Kupon berbentuk persegi 40 mm dengan ketebalan 3,0 mm, kedua sisinya diratakan dan disejajarkan hingga ± 10 mikrometre, serta dipotong dari tiga balok ekuatorial berkategori 5N yang dipilih berdasarkan protokol utama agar kontaminasi magnetik tidak mengacaukan pembacaan dielektrik. Setiap set kupon dikondisikan hingga mencapai kesetimbangan pada tiga kadar air -- 8, 12, dan 16 persen -- dalam ruang kelembapan, lalu kadar airnya diverifikasi secara gravimetrik terhadap massa kering-oven pada akhir pengujian.

Sel yang digunakan adalah perangkat pelat-sejajar berpelindung seperti jenis yang dijelaskan sebelumnya (Tanaka dan Park, 2022), digerakkan oleh penganalisis impedansi Keysight E4990A dari 20 Hz hingga 10 MHz. Cincin pelindung menekan medan pinggir sehingga kapasitansi terukur bersesuaian dengan luas elektrode yang terdefinisi dan permitivitas yang diekstraksi merupakan nilai curah bahan alih-alih perkiraan yang tercemar tepi; tangen rugi dibaca langsung sebagai faktor disipasi perangkat. Kontak dibuat melalui lapisan antara elastomer konduktif tipis untuk mengakomodasi kekasaran permukaan residual pada sisi yang digiling tanpa perekat yang akan menyumbangkan polarisasinya sendiri.

Pada kadar air 12 persen dan 1 kHz, jati menghasilkan $\epsilon_{s_L} = 2,64$, $\epsilon_{s_R} = 2,09$, dan $\epsilon_{s_T} = 2,02$, dengan rasio anisotropi $\epsilon_{s_L} / \epsilon_{s_T}$ sebesar 1,31 dan $\epsilon_{s_L} / \epsilon_{s_R}$ sebesar 1,26; kedua sumbu transversal bersesuaian dalam 4 persen, sebagaimana diharapkan. Tangen rugi mengikuti urutan yang sama: $\tan \delta$ sebesar 0,021 sepanjang serat dan 0,014 hingga 0,015 melintasinya. Di seluruh pita audio dari 20 Hz hingga 20 kHz, permitivitas mendatar dalam 3 persen dan rasio anisotropi bertahan antara 1,24 dan 1,31. Menaikkan kadar air menjadi 16 persen mengangkat setiap nilai -- ϵ_{s_L} mencapai 3,08 -- dan, terutama, sedikit memperlebar anisotropi, karena air terikat tambahan terutama terpolarisasi sepanjang sumbu yang diutamakan. Pengeringan hingga 8 persen memperkecil nilai absolut maupun rasionya. Dengan demikian, anisotropi bukan konstanta bahan yang tetap, melainkan konstanta yang dimodulasi kelembapan, paling kuat ketika paling tidak diinginkan (basah) dan paling lemah ketika bahan paling kering; pada spesifikasi pengiriman 12 $\pm$ 1 persen, anisotropi terpisahkan dengan nyaman dan stabil.

4. MODEL KAPASITANSI TERDISTRIBUSI UNTUK DUDUKAN, KABEL, DAN KOLOM

Untuk mengubah tiga permitivitas menjadi keputusan desain, kita memerlukan geometri kopling. Kabel tidak berada di atas blok datar; kabel bertumpu dalam dudukan, alur berjari-jari dangkal yang dikerjakan pada sisi atas, sehingga sebuah busur terbatas pada selubung kabel hanya dipisahkan dari kayu oleh ketebalan dinding selubung. Kayu tepat di bawah busur tersebut -- kolom vertikal pendek yang membentang dari lantai dudukan ke dalam badan blok -- merupakan tempat medan antara konduktor dan setiap jalur balik tanah jauh paling kuat serta tempat sebagian besar kapasitansi kabel-ke-penyangga tersimpan. Kayu yang lebih jauh ke luar dan lebih jauh ke bawah berkontribusi dengan bobot yang turun cepat ketika medan menyebar dan melemah.

Kami memodelkannya sebagai kapasitansi terdistribusi per satuan panjang bentangan, dengan mengintegrasikan energi medan lokal melalui volume kayu di bawah dan di sekitar dudukan serta memasukkan tensor permitivitas kayu sumbu demi sumbu. Konstruksinya standar bagi dielektrik anisotropik: komponen medan vertikal mencuplik permitivitas sumbu vertikal, komponen horizontal mencuplik permitivitas sumbu horizontal, dan karena dudukan memusatkan medan ke kawasan nyaris vertikal tepat di bawah konduktor sementara jalur balik yang menutup kapasitansi membentang ke luar dan ke bawah melalui sisi kolom, permitivitas horizontal menanggung bagian energi tersimpan yang lebih besar. Keluaran model adalah satu angka yang penting secara rekayasa: kapasitansi yang ditambahkan blok kepada kabel, dalam pikofarad per blok, sebagai fungsi orientasi tensor permitivitas.

Dua orientasi memiliki kepentingan praktis. Penggilingan serat-ujung-vertikal menempatkan sumbu longitudinal L secara vertikal, menuruni jalur beban, dan membiarkan kedua sumbu transversal rendah R serta T berada di bidang horizontal. Penggilingan serat-permukaan (gergaji datar, serat horizontal) membaringkan sumbu longitudinal L ke bidang horizontal, tempat sumbu itu dicuplik oleh komponen medan horizontal yang kuat, dan mendirikan satu sumbu transversal secara vertikal. Memasukkan konstanta 12 persen terukur ke model untuk geometri dudukan representatif (diameter kabel 12 mm, dudukan berjari-jari 3 mm, tinggi blok 60 mm, jalur balik tanah nominal pada jarak sasis) menghasilkan kira-kira 1,9 pF per blok untuk orientasi serat-ujung dan



kira-kira 2,3 pF per blok untuk orientasi serat-permukaan -- selisih mendekati 0,4 pF, sekitar 18 persen, yang timbul hanya dari sudut potongan. Per blok, angka ini kecil. Angka ini juga nyata, dapat diulang, bertanda tunggal, dan gratis: biayanya bagi pembuat hanya keputusan untuk mengorientasikan balok dengan benar, dan nilainya terakumulasi sepanjang beberapa blok dalam satu bentangan penuh.

5. SAPUAN SUDUT SERAT DAN KEPEKAAN KELEMBAPAN

Kedua orientasi yang disebutkan merupakan titik ujung suatu kontinum, dan patut dipastikan bahwa serat-ujung adalah minimum sejati, bukan sekadar pilihan yang lebih baik dari dua pilihan sembarang. Kami mengerjakan serangkaian kupon pada sudut serat dari 0 deg (serat vertikal, serat-ujung sejati), melewati 30, 45, 60, hingga 90 deg (serat horizontal, serat-permukaan) relatif terhadap sumbu beban, lalu mengukur masing-masing dalam geometri model dudukan dengan konduktor yang dialiri listrik di atasnya. Kapasitansi beracuan kabel naik secara monoton bersama sudut serat, dari minimum serat-ujung pada 0 deg hingga maksimum serat-permukaan pada 90 deg, dengan erat mengikuti pembobotan kuadrat-kosinus yang diprediksi model tensor ketika sumbu longitudinal berpermitivitas tinggi secara bertahap berputar masuk ke medan horizontal. Kurva landai di dekat 0 deg -- beberapa derajat kesalahan penggilingan hampir tidak merugikan apa pun -- dan paling curam di tengah sapuan, sehingga penalti untuk potongan yang benar-benar ceroboh lebih besar daripada penalti untuk potongan yang tidak sempurna tetapi dibuat dengan niat baik. Nilai minimum berada pada serat-ujung sejati, dan benar-benar minimum, bukan titik infleksi.

Kadar air menggeser seluruh kurva secara vertikal tanpa memindahkan lokasi minimum. Karena permitivitas naik tajam bersama air terikat, blok yang bergeser dari kadar air 12 menjadi 16 persen menambah lebih banyak kapasitansi dalam nilai absolut daripada seluruh selisih serat-ujung-ke-serat-permukaan pada kelembapan tetap -- tuas kelembapan lebih besar daripada tuas orientasi. Namun, keduanya independen: membasahi kayu menaikkan lantai, tidak mengubah orientasi mana yang paling rendah. Karena itu, orientasi dan pengondisian merupakan kendali yang saling melengkapi, dan keduanya harus dijalankan. Inilah dasar terukur untuk mengeringkan setiap balok berkategori di tanur sejak asalnya hingga 12 +/- 1 persen dan untuk pemeriksaan kelembapan tahunan dalam jadwal pemeliharaan: orientasi digiling secara permanen dan tidak dapat bergeser, tetapi kelembapan yang menskalakannya dapat bergeser, dan penyangga yang dibiarkan mencapai kesetimbangan dengan ruangan lembap perlahan menyerahkan margin yang telah diamankan meja penggilingan.

Kami mencatat sepintas bahwa kesesuaian sumbu transversal yang diukur pada Bagian 3 berarti pilihan antara tampilan radial dan tangensial pada bidang horizontal tidak berarti dalam ketidakpastian pengukuran; blok dapat diindeks secara rotasional terhadap sumbu vertikalnya untuk memperoleh tampilan terbaik lingkaran sisi atas tanpa konsekuensi dielektrik, selama serat tetap vertikal.

6. PEMBAHASAN: DUA ARGUMEN, SATU ORIENTASI

Orientasi serat-ujung tidak diterapkan karena perilaku dielektriknya. Orientasi itu diterapkan karena serat-ujung merupakan cara paling kaku dan paling kuat untuk membebani kayu dalam kompresi: ketika serat berdiri vertikal, beban ke bawah ditanggung sepanjang sel berbentuk tabung dalam arah terkuatnya, dan blok menahan berat statis bentangan kabel serta penurunan instalasi dengan rangkai paling sedikit dan perubahan dimensi paling kecil. Itu merupakan pengetahuan rekayasa kayu yang tua dan tidak kontroversial, serta menetapkan spesifikasi penggilingan sebelum permitivitas mana pun diukur.

Pengukuran dielektrik yang dilaporkan di sini dilakukan setelahnya, dan pada prinsipnya dapat saja tidak bersepakat dengan pilihan mekanis -- sumbu sepanjang-serat mungkin merupakan sumbu berpermitivitas rendah, sehingga mendirikannya secara vertikal akan benar secara mekanis tetapi salah secara elektrik, dan kompromi akan terpaksa dibuat. Pengukuran tidak menunjukkan pertentangan tersebut. Sumbu sepanjang-serat merupakan sumbu berpermitivitas tinggi, sehingga mendirikannya secara vertikal menyingkirkannya dari bidang horizontal tempat medan kabel paling kuat, tepat seperti yang diminta model kapasitansi. Orientasi yang ideal secara mekanis, secara independen, juga merupakan orientasi yang paling senyap secara dielektrik. Kedua argumen dibangun dari fisika berbeda, pada waktu berbeda, oleh orang-orang yang memecahkan masalah berbeda, dan keduanya memilih potongan yang sama.

Kami tidak memberikan bobot mistis pada kesesuaian ini; bahan anisotropik sering memiliki sumbu kaku dan sumbu berpermitivitas tinggi yang terselaraskan, karena kedua sifat tersebut berasal dari mikrostruktur selaras yang sama, dan jati merupakan bahan demikian. Namun, konsekuensi praktisnya tetap berlaku. Pembuat yang mengikuti argumen mekanis saja tiba pada serat-ujung dan, tanpa bermaksud demikian, turut meminimalkan kopling kapasitif. Pembuat yang mengabaikan argumen mekanis demi serat permukaan dekoratif merugi pada kedua sisi sekaligus. Konvergensi bukan kebetulan yang perlu dikagumi, melainkan alasan untuk memercayai spesifikasi: ketika dua jalur penalaran independen berakhir pada angka yang sama, kemungkinan angka tersebut benar menjadi lebih besar.

7. KESIMPULAN

Kayu adalah benda yang anisotropik secara dielektrik, dan penyangga kabel kayu adalah benda tersebut yang ditempatkan di medan dekat konduktor. Kontribusinya terhadap instalasi berupa kapasitansi terdistribusi kecil yang besarnya ditetapkan pembuat, disadari atau tidak, di meja penggilingan. Kami mengukur permitivitas dan rugi jati ekuatorial pada tiga sumbu, mengonfirmasi urutan yang diharapkan $\epsilon_{s_L} > \epsilon_{s_R} \sim \epsilon_{s_T}$ dengan rasio anisotropi mendekati 1,3 pada kadar air pengiriman,



lalu membawa konstanta itu melalui model kapasitansi dudukan-dan-kolom hingga menjadi angka manfaat -- pikofarad per blok -- yang berbeda secara terukur antara penggilingan serat-ujung dan serat-permukaan. Serat-ujung merupakan yang lebih rendah, sekitar 0,4 pF dan 18 persen dalam geometri representatif, dan sapuan sudut serat mengonfirmasinya sebagai minimum sejati.

Marginnya kecil per blok dan kami menolak melebihi-lebihkannya. Yang kami tegaskan hanyalah bahwa margin itu nyata, memiliki arah yang disukai, dan arah yang disukai merupakan arah yang telah ditetapkan atas dasar mekanis. Blok Elevasi Ekuatorial digiling dengan serat-ujung-vertikal karena serat-ujung merupakan cara paling kaku untuk menanggung beban tekan; analisis dielektrik yang dilaporkan di sini dilakukan setelahnya dan mengonfirmasi bahwa potongan yang sama juga paling senyap secara dielektrik. Setiap blok dikirim dengan serat-ujung menghadap atas, dikeringkan dalam tanur hingga 12 +/- 1 persen, tanpa lapisan akhir, dengan kelas dan konstanta terukurnya pada sertifikat. Kami mengundang pembaca untuk menanyakan kepada pembuat penyangga kayu lainnya ke arah mana serat produk mereka membentang, dan mengapa.

REFERENSI

- [1] James, W. L. (1975). Sifat dielektrik kayu dan papan keras: variasi menurut suhu, frekuensi, kadar air, dan orientasi serat. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Sifat dielektrik kayu dan bahan berbasis kayu. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Hubungan kayu-air. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Sifat dielektrik kayu. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Penilaian netralitas magnetik kayu struktural: klasifikasi kemurnian kelas-N untuk bahan penyangga audio. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Pengukuran permitivitas pelat-sejajar berpelindung pada padatan anisotropik dengan rugi rendah. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.